

УДК 551.311.24

ХИМИЧЕСКАЯ ДЕНУДАЦИЯ РАВНИН

А.Н. Шарифуллин, Р.Р. Денмухаметов, Е.Д. Кожеватов, В.И. Мозжерин

Аннотация

В статье оценивается интенсивность химических денудационных процессов на равнинах земной суши. Величина химической денудации определяется на глобальном, региональном и локальном уровнях с использованием трех методических подходов.

Ключевые слова: химическая денудация, речной бассейн, сток растворенных веществ рек, химический состав природных вод, природные и антропогенные факторы, природные зоны, метод таблеток.

Введение

Важнейшие тенденции современного развития физико-географического направления, геоморфологии в последние десятилетия – их динамизация и экологизация. Существенное место в изучении геоморфологических и географических процессов занял количественный подход. Одной из общегеографических и общегеоморфологических проблем этого направления является оценка пространственной изменчивости стока растворенных веществ (РВ) рек, химической денудации равнин. Попытки решить эту проблему на глобальном, региональном уровнях предпринимались еще с XIX века на очень ограниченном фактическом материале.

В Казанском университете на протяжении второй половины XX и начала XXI вв. основное внимание было уделено изучению экстремального проявления химической денудации – карста. Большой вклад в изучении карста Среднего Поволжья внес А.В. Ступишин [1], Бугульмино-Белебеевской возвышенности – А.Г. Мусин [2], Марийской АССР – Н.Н. Лаптева [3], севера Европейской территории России – Н.П. Торсуев [4, 5].

В 1970–1980-е годы началось изучение механизмов проявления этого сложного природного процесса и были определены основные закономерности не только морфологического проявления, но и механизма самого явления, а также были разработаны методы количественной оценки величины химической денудации ([6–8] и др.).

Появление новых данных по стоку РВ, новых методических и технических подходов к их обработке определило необходимость нового обобщения по данной тематике.

Исходный материал и методы исследований

Методы исследований пространственной дифференциации стока РВ рек и оценки величины химической денудации объединяются в три группы: 1) оцен-

ка по стоку РВ рек; 2) учет потери веса эталонных образцов горных пород (метод таблеток); 3) расчетные методы.

Каждая группа методов опирается на различный исходный материал, дает оценку химической денудации с разной детальностью и отражает свои аспекты растворения горных пород, их химического преобразования и последующего выноса продуктов химического выветривания. В зависимости от особенностей применяемого метода по-разному может быть расшифрована структура химической денудации, под которой понимается набор генетических составных частей, их соотношение между собой и абсолютные величины каждой из них. Для геоэкологических и геоморфологических целей, а также понимания происхождения отдельных составных частей химической денудации наиболее важно ее разделение на поверхностную и подземную, естественную и антропогенно обусловленную денудацию растворения и выветривания [6, с. 2–24].

Сток РВ после выделения в нем денудационной (литогенной) составляющей позволяет довольно точно оценить химическую денудацию как в пространственном, так и во временном аспектах ([6, с. 2–24; 7, с. 4–18; 8, с. 3–12] и др.). Данные по этому виду стока рек наиболее пригодны для структурного расчленения химической денудации. Ограничения, связанные с использованием этого метода, сводятся к большому пространственному (бассейновому) обобщению величин денудации и к необходимости очень тщательного выбора методов выделения неденудационной части стока РВ. Всегда приходится учитывать очень неравномерное размещение постов гидрохимических наблюдений и разновременной период наблюдений.

Метод таблеток, основанный на определении величины химической денудации по потере веса эталонных образцов горных пород, позволяет исключительно детально оценить пространственную изменчивость химической денудации, в том числе внутри речного бассейна и даже по отдельным элементам рельефа [9; 10, с. 102–114]. Этим методом хорошо выявляются также различия в растворимости разных по литологическому составу горных пород.

Расчетные методы довольно многочисленны и учитывают весьма различные факторы, способные повлиять на величину химической денудации [6, с. 8–26]. Наибольшую известность из этих методов получил так называемый гидрометрический метод Ж. Корбеля [11, 12], который до сих пор используется для расчетов интенсивности карстовой денудации в региональных исследованиях [13]. Хотя уже давно различными исследователями, опирающимися на фактический, а не расчетный материал, убедительно показана ошибочность теоретических допущений Ж. Корбеля и их противоречие с реальными фактами о развитии химической денудации, особенно о характере ее зонального изменения ([6, с. 158–159; 14] и др.). Л. Якуч [15] охарактеризовал теоретические выводы Ж. Корбеля как «одну из самых эффектных, но ошибочных доктрин геоморфологии».

Для оценки интенсивности химической денудации использованы отдельные методы всех трех групп. Они позволяют с различных позиций определять картину пространственной дифференциации выноса материала в растворенном виде.

Для востока Русской равнины величина химической денудации была рассчитана по гидрохимическим данным за более чем 40-летний период на 106 бассейнах малых рек.

Определение величины химической денудации методом учета потери веса эталонных образцов горных пород основано на результатах стационарных наблюдений за интенсивностью химической денудации на территории Среднего Поволжья и Кольского полуострова за период с 1988 по 1999 гг. Таблетки разного литологического состава (гипс, ангидрит, известняк) были заложены в разных ландшафтных условиях от тундры до лесостепи на различных элементах рельефа – водораздел, склон и др. Пункты наблюдения расположены в следующих природных зонах: тундра (Хибины), северная тайга (Кировск), южная тайга (Еланьер, Карман-Курук, Вятские Поляны), лесостепь (Байлянгар). Всего за период наблюдения получены сведения об интенсивности растворения по 159 таблеткам (гипс – 67, ангидрит – 38, известняк – 54). Интенсивность химической денудации определяется величиной потери веса таблеток, которые пересчитаны в значения снижения поверхности таблеток и выражены в мм/год. Были рассчитаны минимальные, максимальные и средние значения для таблеток разного литологического состава и отдельно по элементам рельефа (водораздел, склон, днище карстовой воронки).

Изучение химической денудации в глобальных масштабах в основном проводится по стоку РВ рек. Сформирован исходный массив данных стока РВ рек по 1120 пунктам наблюдения на всех континентах, кроме Антарктиды, из них 762 – для равнинных рек. Основная часть стока РВ приходится на главные ионы, кроме того, преимущественно ими же представлена денудационная часть растворенного материала, поэтому в оценке интенсивности химических процессов в речных бассейнах использована ионная составляющая стока РВ.

Результаты

Анализ речного стока РВ малых рек на востоке Русской равнины позволил установить основные закономерности проявления химической денудации и структурные составные части – поверхностную и подземную составляющие, а также связанные с растворением и выветриванием пород [6].

Рассчитаны площадные и объемные модули химической денудации. Связь между этими модулями высокая (коэффициент корреляции $r = 0.81$). В среднем по отношению к общему выносу РВ ($55.5 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$) денудация ($26.3 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$) составляет лишь 47% при колебаниях от 12 до 85%. Химическая денудация меньше общего химического выноса на $15\text{--}40 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$. Основная часть химической денудации приходится на речной сток (92%, или $24.3 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$). С испарением и подземным водообменном связано в среднем около 8%, или $2.1 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$.

Величина общей химической денудации подвержена значительным колебаниям. Величина ее в первую очередь определяется составом горных пород, слагающих бассейны ($r = 0.77$). Наименее подверженными химической денудации оказались кремнистые породы ($4 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$), в 27 раз быстрее разрушаются преимущественно сульфатные породы. Промежуточное положение занимают другие литологические разности, при этом выдерживается следующая закономерность: чем больше в составе дренируемых отложений развиты карбонатные и сульфатные породы, тем интенсивнее химическая денудация. Этот вывод в

целом согласуется с известными данными по растворимости различных типов горных пород.

Пространственное изменение величин химической денудации отражает в первую очередь геологическое строение территории. Приуральская полоса развития карбонатных, карбонатно-сульфатных и нижнепермских пород фиксируется величинами денудации не менее $40 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$, достигая $100\text{--}150 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$ (Уфимское плато). В верховьях Вятки, Камы на терригенных и карбонатно-терригенных породах верхней перми, мезозоя и кайнозоя основной фон химической денудации составляет $10\text{--}20 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$. Минимальная денудация (менее $10 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$) – в областях развития мезозойских и неоген-четвертичных терригенных отложений.

На втором месте по степени влияния оказался жидкий сток. Связь между ним и общей величиной химической денудации оказывается довольно слабой, но прослеживается определенная закономерность: большая денудация наблюдается только при повышенных значениях жидкого стока.

Наиболее репрезентативная оценка антропогенных изменений химической денудации может быть получена при сопоставлении ее современной величины в каком-либо бассейне с величиной, характерной для этого бассейна до его освоения. Для этих целей необходимо восстановление величины жидкого стока, его поверхностной и подземной составляющих в условиях неосвоенного бассейна. Методика таких расчетов разработана В.Е. Водогрецким (1979) [16, с. 12–19]. Однако из-за отсутствия многих необходимых сведений по всей территории восстановить жидкий сток для естественных условий трудно, поэтому использованы данные В.А. Балкова (1981) [17, с. 6–41] по 7 бассейнам рассматриваемой территории. В этих бассейнах в результате хозяйственной деятельности изменилась величина речного стока: уменьшилась в среднем на 38% доля подземной и увеличилась на 27% доля поверхностной составляющих, что привело к увеличению в среднем на 6% общего водного стока. По этим данным рассчитаны значения химической денудации для естественных и современных – антропогенно измененных – условий. Уменьшение подземной химической денудации от ее современной величины составляет 30%, доля же поверхностной химической денудации возросла в среднем на 9%. В итоге такого перераспределения составных частей химической денудации общая ее величина уменьшилась в среднем почти на 10%.

Расчеты показали, что общая величина химической денудации в период до интенсивного хозяйственного освоения на востоке Русской равнины составляла в среднем $29 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$, то есть была больше современного уровня на $2\text{--}3 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$. Подземная денудация составляла в это время около $15 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$, или 50–55% от общей величины (по сравнению с 40% в настоящее время), поверхностная денудация может быть определена как $13\text{--}14 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$ по сравнению с современными $16 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$.

Средние значения химической денудации, определенные методом таблеток, показывают, что интенсивнее растворяется ангидрит, особенно в южной тайге, а медленнее всего – известняк. Потери веса ангидрита составляют 0.7 мм/год – в лесостепи, 1.99 мм/год – в южной тайге, 3.22 мм/год – в северной тайге и 3.1 мм/год – в тундре. Для известняка денудационное снижение составляет 0.58

мм/год в южной тайге, 0.78 мм/год – в тундре, а в лесостепи и в северной тайге по некоторым таблеткам наблюдается в отдельные годы даже незначительное приращение веса. Для гипса величина денудации составила 0.27 мм/год в лесостепи, 0.97 мм/год – в южной тайге.

Рассматривая изменение растворимости таблеток по элементам рельефа можно выделить определенные особенности: более значительные потери веса выявлены для склонов. Наибольшее растворение характерно в южной тайге для таблеток ангидрита (1.4 мм/год), а наименьшее – для гипса (0.55 мм/год). На водоразделе значения потери веса таблеток меньше, чем на склоне. Максимальные значения отмечаются для ангидрита (0.7 мм/год в южной тайге), а таблетки гипса и известняка имеют одинаковые значения (0.4 мм/год). Минимальные потери веса таблеток на водоразделе характерны для лесостепи. С севера на юг отмечается уменьшение величины денудационного снижения для всех литологических разностей.

Наибольший сток РВ равнинных рек мира характерен для субтропического, тропического и экваториального поясов, средний – для умеренного пояса, наименьший – для субарктического. Все природные зоны по средним зональным величинам стока РВ можно подразделить на 5 групп (Д, т/км²·год): 1 – зоны очень слабой химической денудации (< 15): тундра и лесотундра, полупустыни умеренного пояса; 2 – зоны незначительного стока растворенных веществ (15–35): субтропические полупустыни, степи умеренного пояса; 3 – зоны умеренного стока растворенных веществ (36–55): тайга и смешанный лес, лесостепь, субтропические степи, саванны; 4 – зоны повышенной химической денудации (56–75): средиземноморье, широколиственные и субтропические леса, экваториальные леса; 5 – зоны сильной химической денудации (76–90 и более): тропические леса.

Выявлено, что пространственное распределение стока РВ по природным зонам на равнинах обусловлено прежде всего изменением зональных климатических параметров, влияющих на интенсивность протекания химических процессов растворения и выщелачивания горных пород. Зональные климатические условия определяют величину жидкого стока – ведущего зонального фактора, лимитирующего сток РВ рек.

По средним зональным значениям наблюдается очень тесная связь между модулями водного стока и модулями стока РВ ($r = 0.84$). Отдельно стоят тундра и лесотундра, которые входят в особый («холодный») ряд зон, где из-за низких температур достаточно высокий водный сток не может привести к сколь-нибудь значительной химической денудации.

Значительную роль в формировании химического состава природных вод играет состав горных пород, слагающих область активного водообмена приповерхностного слоя земной коры. Отдельные группы пород различаются между собой по модулям стока РВ достаточно отчетливо, образуя возрастающий ряд (в т/км²·год): кристаллические породы (14.0) – осадочные терригенные (18.5) – осадочные смешанные (55.2) – осадочные хемо- и органогенные (132.0). Наибольший сток РВ на породах с малой растворимостью и большой устойчивостью к химическому выщелачиванию (кристаллические и осадочные терригенные) наблюдается в сравнительно теплом и влажном климате широколиствен-

ных и экваториальных лесов, так как для их растворения необходимы наиболее благоприятные термические и водные условия. Химическая денудация осадочных карбонатно-терригенных, хемо- и органогенных пород значительна во всех природных зонах, однако максимальных величин она достигает, преимущественно, в гумидных областях – во влажных субтропических, тропических лесах, в гилее, саванне.

На равнинах сток РВ наиболее сильно возрастает при переходе от низменностей и возвышенностей к равнинным рекам с истоками в горах. Минимальные модули стока РВ наблюдаются на низменностях, что хорошо согласуется с широким распространением в пределах низменных территорий малорастворимых терригенных отложений (Прикаспийская, Западно-Сибирская низменности и др.). На возвышенностях в интервалах высот от 201 до 300 м развито наибольшее количество бассейнов, сложенных легко растворимыми сульфатными и карбонатными породами, поэтому сток РВ здесь несколько выше (Вятские Увалы, Бугульминско-Белебеевская возвышенность и др.). При переходе к высотам во добров, равным 301–500 м, наблюдается уменьшение модулей стока РВ, что определяется увеличением доли устойчивых к химической денудации осадочных терригенных пород, наиболее широко распространенных у подножий склонов гор.

Для определения влияния антропогенных факторов использовалась балльная оценка степени агрикультурной и техногенной освоенности речных бассейнов. Реки наиболее чутко реагируют на техногенное воздействие, проявляющееся в загрязнении вод промышленными объектами, населенными пунктами, нарушении почвенно-растительных и гидрогеологических условий горнодобывающей отрасли и т. д. Анализ почти 7000 проб на содержание основных ионов в речных водах показал, что с увеличением степени освоенности речных бассейнов начинает увеличиваться концентрация таких ионов, как хлор, сульфат-ион, натрий, часто на фоне уменьшения доли гидрокарбонатов и кальция.

С увеличением площади региона (части света или материка) увеличивается пестрота пространственной дифференциации стока РВ, что обусловлено большей континентальностью крупных регионов (Азия), взаимодействием суши и моря на западных окраинах в широтах с преобладающим действием западных ветров, а на восточных, юго-восточных и южных окраинах – муссонов. В целом в центральных частях континентов сток РВ меньше, он возрастает к их западной и восточной перифериям. Наибольший вынос РВ наблюдается в Азии, наименьший у самого маленького по площади континента – Австралии. Другая картина относительно показателей стока РВ наблюдается в разных частях света. Максимальная величина отмечается в частях света с наибольшей увлажненностью – в Европе, Азии, Южной Америке. Наименьшую величину показателя имеют Африка и Австралия, значительные площади которых заняты пустынями и полупустынями, лишенными стока и увлажненности территории которых крайне неравномерна как пространственно, так и по сезонам.

Помимо денудационной части в общем речном стоке РВ содержится определенное количество солей, поступающих с атмосферными осадками и в результате хозяйственной деятельности человека. Выделение этих составляющих основывалось на расчетах М. Мейбека [18] по средней концентрации химиче-

ских элементов в речных водах мира. Вынос солей, обусловленный процессами выветривания, рассчитан по разности между общим речным стоком растворенных веществ и суммой веществ атмосферного происхождения, а также антропогенного генезиса. В составе растворимых продуктов денудационного происхождения основным анионом является гидрокарбонат-ион. Среди катионов главная роль принадлежит кальцию и магнию. Основным источником РВ, по всей видимости, карбонатные породы, наиболее сильно разрушаемые при взаимодействии воды и коренных пород. Вклад натрия и калия невелик и может быть связан с химической денудацией силикатных пород.

Выводы

Впервые с использованием трех методов на разных территориальных уровнях – местном, региональном и глобальном – определена величина химической денудации в речных бассейнах.

Интенсивность химических денудационных процессов определяется составом слагающих водосбор горных пород и величиной жидкого стока.

Группы пород различаются между собой по модулям стока РВ и величинам химической денудации, образуя возрастающий ряд: кристаллические породы, осадочные терригенные, осадочные смешанные, осадочные хемо- и органогенные. Метод таблеток показал, что интенсивнее растворяется ангидрит, особенно, в южной тайге, медленнее всего – известняк.

Химическая денудация равнин максимальна на возвышенностях и в бассейнах рек с истоками в горах, в зоне тайги и широколиственных лесов умеренного пояса, во влажных субтропических и тропических лесах.

Summary

A.N. Sharifullin, R.R. Denmukhametov, E.D. Kozhevnikov, V.I. Mozjerin. The Plain Chemical Denudation.

The article evaluates the intensity of chemical denudational processes on the plain of terrain. Chemical denudation scale is determined on global, regional and local levels with the usage of three methods.

Key words: chemical denudation, river basin, discharge of river dissolved solids, chemical composition of natural water, natural and antropogenic factors, natural zones, tablets method.

Литература

1. *Ступинин А.В.* Равнинный карст и закономерности его развития на примере Среднего Поволжья. – Казань: Изд-во Казан. ун-та. – 1967. – 291 с.
2. *Мусин А.Г.* Карст Бугульмино-Белебеевской возвышенности: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. – Казань, 1966. – 32 с.
3. *Лантева Н.Н.* Поверхностные и подземные формы карста Марийской АССР и их генетические ряды // *Землеведение*. – 1974. – Т. 10. – С. 41–47.
4. *Торсуев Н.П.* Карст Онего-Северодвинского междуречья. Опыт физико-географической характеристики карста севера Русской равнины. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1964. – 102 с.

5. *Торсуев Н.П., Левин С.А.* Географические аспекты изучения равнинного карста. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1980. – 208 с.
6. *Мозжерин В.И., Шарифуллин А.Н.* Химическая денудация гумидных равнин умеренного пояса. – Казань: Изд-во Казан. ун-та. – 1988. – 192 с.
7. *Алекин О.А., Бражникова Л.В.* Сток растворенных веществ с территории СССР. – М.: Наука, 1964. – 144 с.
8. *Лушиников Е.А.* Геологическая деятельность современных рек Урала и прилегающих равнин (гидрохимическая роль и денудация. – Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1974. – 124 с.
9. *Gams J.A.* New method determining the karstic soil erosion // Symposium on karst morphogenesis. – Hungary, 1975. – P. 123–138.
10. *Pulina M.* Denudacja chemiczna na obszarach krasu węglanowego // Prace Geograficzne IG PAN. – 1974. – No 105. – 159 s.
11. *Corbel J.* Erosion en terrain calcaire: vitesse d'érosion morphologie // Ann. Geogr. – 1959. – V. 68, No 366. – P. 124–130.
12. *Corbel J.* L'érosion terrestre, étude quantitative (Méthodes. Techniques. Resultats) // Ann. Geogr. – 1964. – V. 73, No 398. – P. 385–412.
13. *Трофимова Е.В.* Карстовая денудация на территории Сибири и Дальнего востока: особенности современного развития // Геоморфология. – 2006. – № 3. – С. 78–84.
14. *Дедков А.П., Дедкова И.А.* Новые данные о роли климата в развитие карста. (Обзор литературы) // Карст равнинных территорий Европейской части СССР. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1974. – С. 136–143
15. *Jakucs L.* The role of climate in the quantitative and qualitative control of Karstic corrosion // Acta Geogr. Szeged. – 1970. – T. 10, F 1–8. – P. 3–19.
16. *Водогрецкий В.Е.* Антропогенное изменение стока малых рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 176 с.
17. *Балков В.А.* Гидрологические исследования малых рек. – Уфа: Изд-во Баш. ун-та, 1981. – 44 с.
18. *Meybeck M.* Dissolved and suspended matter carried by rivers: composition, time and space variations, and world balance // Interactions between sediments and fresh water / Ed. H.L. Golterman. – The Hague (Netherlands): W. Junk, 1977. – P. 25–32.

Поступила в редакцию
14.03.08

Шарифуллин Амир Нуруллаевич – кандидат географических наук, заведующий кафедрой физической географии и геоэкологии Казанского государственного университета.

E-mail: ggf@mail.ru

Денмухаметов Рамиль Рафаилович – кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии и геоэкологии Казанского государственного университета, директор Центра содействия занятости студентов и трудоустройству выпускников КГУ.

E-mail: cstvkgu@mail.ru

Кожеватов Евгений Данилович – старший преподаватель кафедры физической географии и геоэкологии Казанского государственного университета.

Мозжерин Владимир Ильич – доктор географических наук, профессор кафедры физической географии и геоэкологии Казанского государственного университета.